

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Lintang (2010), dalam penelitiannya bahwa laju perpindahan kalor, efektivitas (*effectiveness*), dan *number of transfer unit (NTU)* meningkat dengan semakin besarnya jarak antar *flat filler* horizontal pada nilai debit air masuk *cooling tower* dalam kondisi konstan.

Irfan (2010), dengan judul penelitian pengaruh kondisi udara masuk terhadap unjuk kerja *cooling tower*. hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa semakin tinggi kelembapan relative dan kecepatan udara masuk pada *cooling tower* maka nilai unjuk kerja *cooling tower* akan semakin meningkat pada nilai debit udara masuk yang tetap.

Faris (2011), dengan judul penelitian pengaruh sudut semprotan air terhadap unjuk kerja *cooling tower* di dalam penelitiannya menyatakan bahwa pada nilai debit udara yang sama semakin besar sudut semprotan air yang masuk *cooling tower* maka nilai unjuk kerja pada *cooling tower* semakin meningkat.

2.2 Cooling Tower

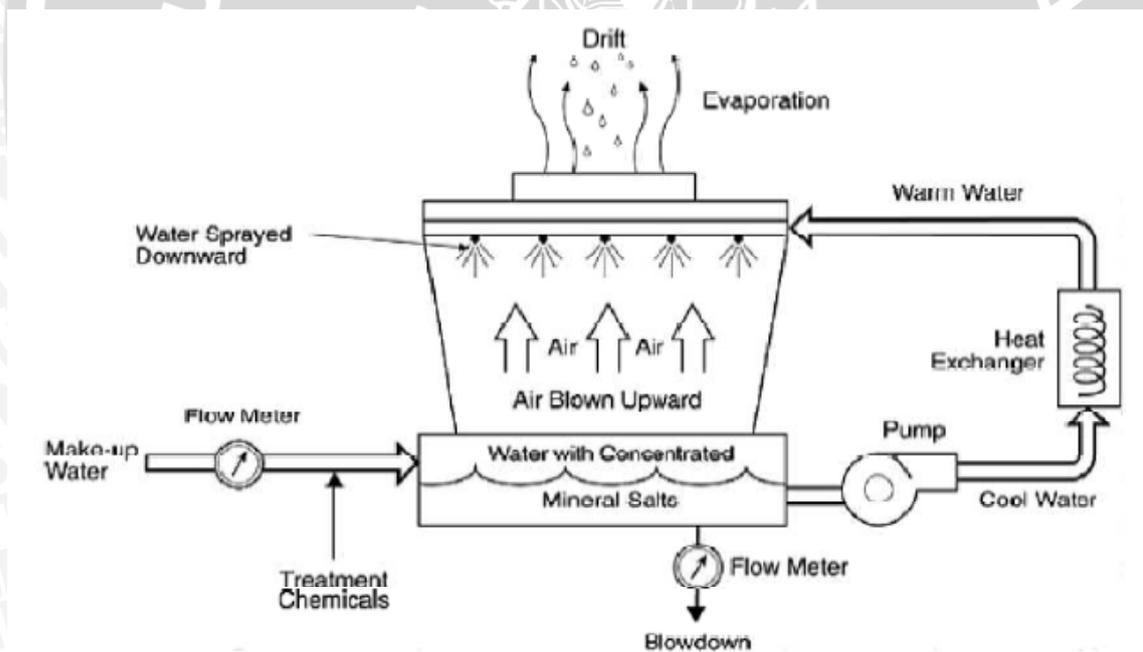
2.2.1. Pengertian dan Prinsip Kerja *Cooling Tower*

Menurut *Cooling Technology Institute*, *cooling tower* adalah sebuah alat pelepas kalor yang membuang panas ke atmosfer dengan mendinginkan aliran air sehingga mencapai temperatur yang lebih rendah. Sedang menurut Swanekamp (1989:137) *cooling tower* adalah sebuah alat penukar kalor khusus dimana dua fluida (air dan udara) dikontakkan langsung antara satu dengan yang lainnya untuk memindahkan panas (*waste heat*) ke atmosfer.

Prinsip kerja menara pendingin (*cooling tower*) dapat dilihat pada gambar di atas. Air dari bak/basin dipompa menuju *heater* untuk dipanaskan dan dialirkan ke menara pendingin. Air panas yang keluar tersebut secara langsung melakukan kontak dengan udara sekitar yang bergerak secara paksa karena pengaruh *fan* atau *blower* yang terpasang pada bagian atas menara pendingin, lalu mengalir jatuh ke bahan pengisi.

Sistem ini sangat efektif dalam proses pendinginan air karena suhu kondensasinya sangat rendah mendekati suhu *wet-bulb* udara. Air yang sudah mengalami penurunan suhu ditampung ke dalam bak/basin. Pada menara pendingin juga dipasang katup *make up water* untuk menambah kapasitas air pendingin jika terjadi kehilangan air ketika proses *evaporative cooling* tersebut sedang berlangsung

Didalam *cooling tower* terjadi proses penguapan akibat perbedaan tekanan uap antara air dengan uap air di udara. Proses penguapan ini mengakibatkan perpindahan kalor laten dari air ke udara karena pada saat penguapan terjadi kalor laten ikut terbawa uap air. Uap air yang terbentuk pada permukaan air mengakibatkan terjadinya perbedaan konsentrasi uap air di antara lapisan air dan udara. Perbedaan ini akan mengakibatkan terjadinya difusi uap air dari air ke udara sehingga udara menjadi jenuh. Difusi merupakan perpindahan massa yang mempunyai ciri adanya massa yang berpindah dari satu fase ke fase lainnya (Kern, 1988:564).



Gambar 2.1. Diagram Skematik Sistem Menara Pendingin.
Sumber: Zaky (2008)

Menurut El-Wakil (1992:260-263) bagian-bagian dari *cooling tower* adalah:

1. Sistem Distribusi Air (*water-distribution system*)

Sistem distribusi air pada *cooling tower* berguna untuk menyalurkan air panas dari kondensor secara merata ke seluruh bagian *cooling tower*. Bahan pengisi (*Filler* atau *Packing*)

2. Isian (*Filler* atau *Packing*)

Dalam menara pendingin, air panas didistribusikan diatas media pengisi dan didinginkan melalui penguapan ketika menuruni menara dan bersentuhan dengan udara. Bahan pengisi (*Filler* atau *Packing*) merupakan jantung dari *cooling tower*. Selain kuat, isian ini juga harus mampu menimbulkan kontak air dengan udara agar terjadi perpindahan panas dan massa dengan baik, serta memiliki hambatan yang rendah terhadap aliran udara. Isian harus kuat, ringan, dan tahan lapuk. Bahan pengisi biasanya terbuat dari plastik, termasuk *PVC*, *Polypropylene*, dan polimer lainnya. Bahan pengisi *film* dipilih untuk penggunaan yang sirkulasi airnya bebas dari sampah yang dapat menghalangi lintasan bahan pengisi.

3. Hanyutan dan pencegah hanyutan (*Drift* dan *Drift Eliminator*)

Hanyutan adalah air yang terbawa oleh arus udara sebagai butir *droplet* yang belum menguap. Hanyutan menyebabkan sebagian air dalam sistem air sirkulasi hilang dan tidak ikut berfungsi dalam pemindahan kalor melalui penguapan. Peristiwa ini dapat diminimalkan dengan menggunakan *drift eliminator* yang berupa sekat-sekat yang dipasang beberapa baris. Sekat tersebut membuat udara terpaksa berubah arah secara tiba-tiba. Momentum dari butir-butir yang berat menyebabkan butir cairan tersebut terpisah dari udara pada waktu menumbuk sekat sehingga membentuk lapisan film air yang kemudian jatuh kembali ke bawah.

2.2.2. Klasifikasi *Cooling Tower*

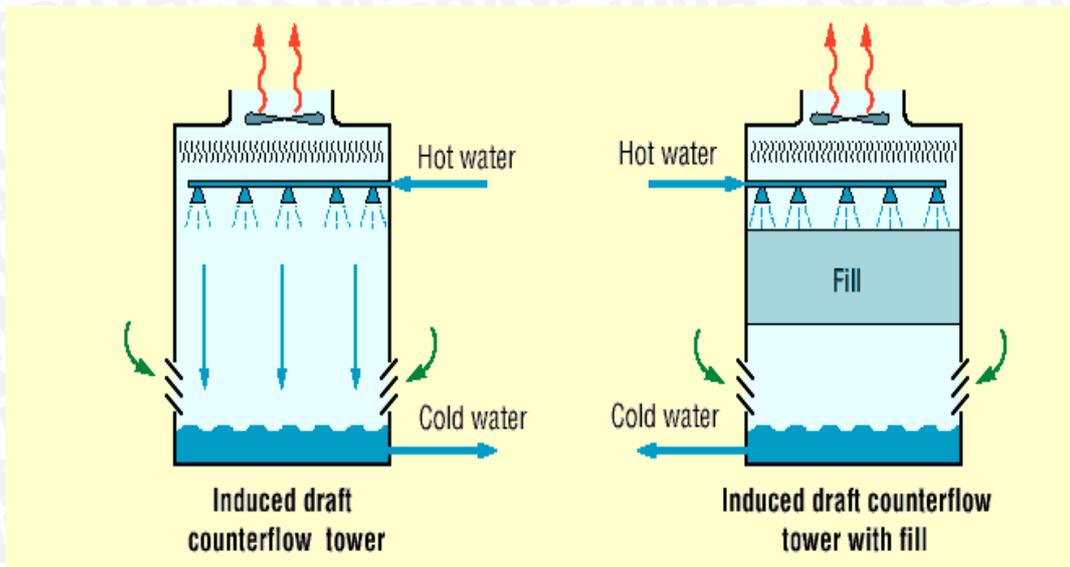
Menurut Kern (1988:577) *cooling tower* diklasifikasikan menurut udara yang disuplai ke menara, yaitu:

1. *Mechanical Draft Tower*

Pada menara ini, udara berpindah karena satu atau beberapa fan yang digerakkan secara mekanik (El-Wakil, 1992:256).

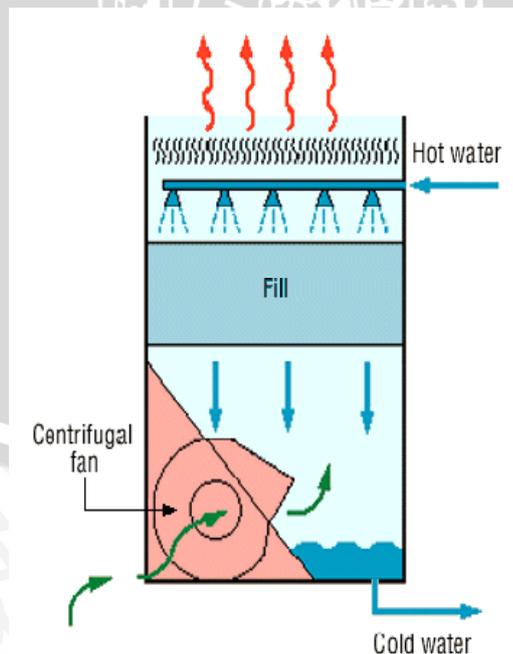
Cooling tower jenis ini dibagi menjadi 2 yaitu:

- a. *Induced draft*, udara dihisap ke dalam menara oleh fan yang terletak di atas melalui bagian bawah.



Gambar 2.2. *Induced draft Cooling tower* dengan aliran berlawanan.
 Sumber: Zaky (2008)

- b. *Forced draft*, udara yang dimasukkan ke dalam menara oleh fan/blower yang terletak di bagian bawah dan dikeluarkan melalui atas. Menara pendingin jenis ini Jenis ini secara teoritis lebih disukai karena *blower* beroperasi dengan udara yang lebih dingin, sehingga konsumsi daya menjadi lebih kecil. Akan tetapi, berdasarkan pengalaman jenis ini memiliki masalah-masalah yang berkaitan dengan distribusi udara, kebocoran dan resirkulasi udara kalor dan lembab kembali ke menara, serta masalah pembekuan pada masukan *fan* ketika musim dingin.

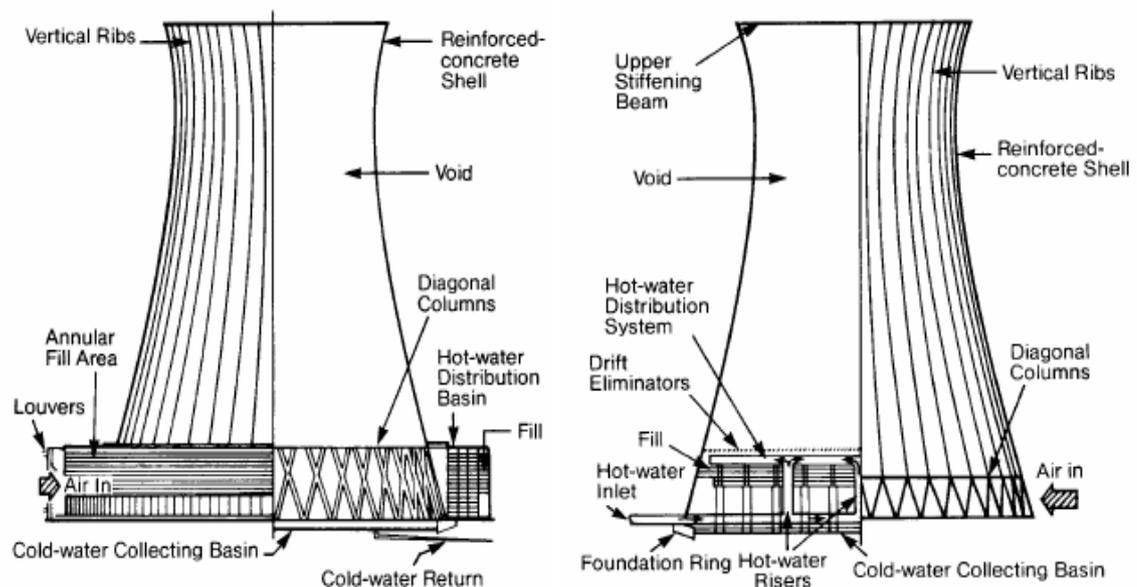


Gambar 2.3. *Forced draft Cooling tower*.
 Sumber: Zaky (2008)

Menara jenis *mechanical draft* merupakan menara yang paling banyak dipakai pada saat ini dan yang paling luas dari jenis ini adalah *induced draft tower*. Hal ini disebabkan dalam penggunaannya menara jenis ini lebih menguntungkan dibandingkan dengan yang lain. Pada jenis *forced draft*, udara masuk melalui fan terbuka dan relatif tidak efektif karena menara harus menyediakan ruang udara masuk sehingga memerlukan dimensi menara yang lebih lebar. Distribusi udara relatif buruk, karena udara harus membuat belokan 90° pada kecepatan tinggi. Pada menara *induced draft*, udara dapat masuk sepanjang dinding dalam menara dan sebagai konsekuensinya ketinggian menara yang dibutuhkan untuk masuknya udara lebih rendah.

2. Natural Draft Tower

Pada menara jenis ini tidak menggunakan kipas. Aliran udaranya tergantung hanya pada tekanan dorong alami yang disebabkan karena adanya perbedaan densitas antara udara dingin luar dan udara panas lembab didalam menara (El-Wakil, 1992:256).



Gambar 2.4. *Natural Draft cooling tower* aliran melintang.

Sumber: Zaky (2008)

Menara *natural draft* beroperasi dengan cara yang sama dengan cerobong dapur pembakaran. Udara dipanaskan didalam menara oleh kontak dengan air panas, sehingga densitasnya menurun. Perbedaan densitas antara udara dalam menara dan udara di luar menara menyebabkan aliran alami udara dingin masuk dari bagian

bawah. Menara ini harus cukup tinggi untuk menimbulkan gaya *buoyancy* yang cukup dan harus mempunyai penampang lintang yang luas karena kecepatan yang rendah dari sirkulasi udara dibandingkan dengan jenis *mechanical draft*.

Setiap jenis dari *cooling tower* tersebut terdiri dari dua macam, yaitu *crossflow* (aliran silang) dan *counterflow* (aliran berlawanan). Disebut *crossflow* apabila aliran udara dan aliran air saling bersilangan. Sedangkan bila aliran udara arahnya saling berlawanan disebut *counterflow*. Keuntungan dan kerugian dari masing-masing jenis ini adalah sebagai berikut:

1. *Crossflow*

Keuntungan:

- a. Head yang dibutuhkan dari pompa rendah
- b. Biaya operasi dan konsumsi energi rendah
- c. Perawatan mudah
- d. *Static pressure drop* yang rendah

Kerugian :

- a. Head rendah dapat mengakibatkan *clogging* (tersumbat)
- b. Peristiwa *Icing* (menjadi Kristal-kristal es) yang sulit dikontrol

2. *Counterflow*

Keuntungan :

- a. *Range* yang dihasilkan lebih besar
- b. *Approach* lebih kecil
- c. Udara yang digunakan lebih efisien
- d. Pergerakan udara vertical membuat performa meningkat

Kerugian :

- a. Daya fan yang dibutuhkan lebih besar
- b. Head yang dibutuhkan lebih tinggi
- c. Biaya operasi dan konsumsi energi lebih besar

2.3 Istilah Yang Digunakan dalam *Cooling Tower*

Dalam pembahasan *cooling tower* ada beberapa istilah yang digunakan dan juga parameter efektivitas dari *cooling tower*, yaitu:

1. Psikrometri dan diagram psikrometri

Psychrometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air, yang mempunyai arti penting dalam bidang teknik penkondisian udara, karena udara atmosfer tidak kering betul tetapi campuran antara udara dan uap air. Prinsip-

prinsip psikrometri banyak diterapkan dalam peralatan sistem pengkondisian udara, menara pendingin (*cooling tower*), pengurangan kelembaban maupun pada proses-proses manufaktur.

Diagram psikrometri menggambarkan beberapa sifat penting dari udara kering hingga lembab, baik harga entalpi, kelembaban dan volume spesifik dari suatu sampel udara yaitu:

a. Kelembaban relatif (ϕ)

Kelembaban relatif (ϕ) didefinisikan sebagai perbandingan antara tekanan parsial uap air di atmosfer terhadap tekanan uap jenuhnya pada temperatur yang sama.

b. Rasio kelembaban (W)

Rasio kelembaban (W) adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Dalam teknik pengatur kondisi udara, untuk menghitung rasio kelembaban dapat digunakan persamaan keadaan. Sehingga dari persamaan keadaan diperoleh rasio kelembaban sebagai berikut:

$$W = 0,622 \frac{p_s}{p_{atm} - p_s} \dots \dots (Stoecker, 1996:41) \quad (2-1)$$

Dimana:

W = rasio kelembaban

p_{atm} = tekanan atmosfer

p_s = tekanan parsial uap air

c. Entalpi

Entalpi campuran udara kering dan uap air adalah jumlah dari entalpi udara kering dan entalpi uap air.

$$h = c_p \times T + W \times h_g \dots \dots (Stoecker, 1996:42) \quad (2-2)$$

dengan :

h = entalpi campuran udara kering dan uap air, [kJ.kg⁻¹]

c_p = kalor spesifik udara kering pada tekanan konstan = 1,0 [kJ.kg⁻¹.K⁻¹]

T = suhu campuran udara dan uap, [K]

h_g = entalpi uap air jenuh pada suhu campuran udara dan uap, [kJ.kg⁻¹]

d. Volume spesifik

Volume spesifik adalah volume udara campuran dengan satuan meter kubik per kilogram udara kering. Dapat juga dikatakan sebagai meter kubik

udara kering atau meter kubik campuran per kilogram udara kering, karena volume yang diisi oleh masing – masing substansi sama. Dari persamaan keadaan gas ideal, volume spesifik v adalah:

$$v = \frac{R_a T}{P_{atm} - P_s} \dots \dots (Stoecker, 1996:43) \quad (2-3)$$

Dimana:

v = volume spesifik [m³/kg]

R_a = tetapan gas untuk udara kering = 287 [J/kg.K]

p_{atm} = tekanan atmosfer [Pa]

p_s = tekanan uap air parsial dalam keadaan jenuh [Pa]

e. Temperatur

Pada psikrometri ada tiga istilah untuk besaran temperatur, yaitu temperatur bola kering (*dry bulb*), temperatur bola basah (*wet bulb*), dan *dew point*. Temperatur bola kering adalah temperatur dari termometer yang bola sensornya terbuka ke atmosfer, temperatur bola basah adalah temperatur dari termometer yang bola sensornya dibungkus dengan kain basah. Sedangkan temperatur *dew point* adalah temperatur saat uap air di atmosfer mulai mengembun.

2. Udara jenuh

Udara jenuh adalah udara yang sudah tidak mampu lagi menerima uap air pada suhu tertentu. Penurunan suhu akan menyebabkan pengembunan, sedangkan kenaikan suhu akan menyebabkan udara tidak jenuh lagi dan mampu menerima uap air. Udara jenuh dapat diperoleh melalui alat penjenuh adiabatik yang mencampurkan udara kering dengan percikan atau aliran udara.

3. Temperatur bola basah

Secara teori, suhu udara jenuh dapat diukur dengan alat penjenuh adiabatik yaitu suatu alat yang mengalirkan udara melewati percikan air. Air tersebut didaurkan terus menerus hingga mencapai kesetimbangan dan diberi penyekat agar tidak ada kalor yang keluar atau masuk. Karena hal ini sulit sekali dilakukan maka digunakan pengukuran temperatur bola basah yang lebih sederhana. Temperatur bola basah adalah suhu yang ditunjukkan oleh thermometer dimana pada bagian bolanya dilengkapi sumbu yang selalu basah. Suhu ini merupakan pendekatan dari suhu udara jenuh yang diukur dengan menggunakan alat penjenuh adiabatik. Selama udara

disekitarnya belum jenuh, temperature yang ditunjukkan selalu dibawah suhu bola keringnya. Hal ini terjadi karena apabila udara tidak jenuh dan sumbu yang digunakan selalu basah, maka tekanan parsial uap air disekitar sumbu basah akan lebih besar daripada tekanan parsial di atmosfer, sehingga terjadi penguapan.

Penguapan akan terjadi pada suhu konstan apabila ada tambahan kalor dari luar. Oleh karena tidak ada kalor yang ditambahkan, maka untuk mengubah fase menjadi uap, air pada sumbu akan melepas sebagian kalor yang dimilikinya sehingga mengakibatkan suhunya turun. Suhu bola basah akan sama dengan suhu bola kering apabila udara sudah mencapai kondisi jenuh.

4. Kelembaban relatif (Φ)

Kelembaban relatif adalah perbandingan tekanan parsial uap air di udara dengan tekanan parsial uap air jenuh pada suhu yang sama. Kelembaban ini biasanya dinyatakan dalam persen di mana kelembaban 0 % merupakan udara kering, sedangkan 100 % adalah udara jenuh. Rumusan dituliskan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{p_s}{p_w} \dots \dots (Stoecker, 1996:40) \quad (2-4)$$

Dimana:

ϕ = kelembaban relatif

p_w = tekanan jenuh air murni pada suhu yang sama

p_s = tekanan parsial uap air di atmosfer

5. Kelembaban absolut

Kelembaban absolut atau rasio kelembaban adalah perbandingan massa uap air dengan massa udara kering dalam udara atmosfer, atau dapat pula didefinisikan sebagai massa uap air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Sehingga dapat dinyatakan

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Karena uap air dan udara dapat dianggap sebagai gas ideal

$$\omega = \frac{p_v V / R_v T}{p_a V / R_a T} = \frac{p_v / R_v}{p_a / R_a} = \frac{p_v R_a}{p_a R_v} = \frac{p_v R_a}{(p - p_v) R_v}$$

Dengan harga $R_a = 287 \text{ J/Kg.K}$ dan $R_v = 461,5 \text{ J/Kg.K}$, diperoleh:

$$\omega = \frac{p_v}{(p - p_v)} \quad (Stoecker, 1996: 41) \quad (2-5)$$

dimana:

ω = kelembaban absolut [kg uap air/kg udara kering]

V = volume campuran udara-uap [m^3]

p = tekanan atmosferik

p_a = tekanan parsial udara kering [Pa]

p_v = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh [Pa]

T = suhu mutlak campuran udara-uap [K]

R_v = tetapan gas untuk uap air [J/kg.K]

R_a = tetapan gas untuk udara kering [J/kg.K]

6. Efektivitas *cooling tower*

Efektivitas (*Effectiveness*) suatu alat penukar kalor adalah kemampuan untuk melepas kalor secara aktual dibandingkan dengan kalor maksimum yang mungkin dilepas. Perpindahan kalor aktual dapat dihitung dari perubahan suhu aktual yaitu selisih suhu fluida panas masuk (T_{hi}) dan keluar (T_{ho}) sebesar $\Delta T_{act} = T_{wi} - T_{wo}$. Sedangkan perpindahan kalor maksimum diperoleh jika salah satu fluida mengalami perubahan suhu sebesar beda suhu maksimum yaitu selisih suhu fluida panas masuk (T_{hi}) dan fluida dingin masuk (T_{ci}) sebesar $\Delta T_{max} = T_{wi} - T_{aw_i}$

Dengan demikian efektivitas alat penukar kalor dirumuskan dengan:

$$\varepsilon = \frac{Q_{out}}{Q_{max}} \quad (\text{Holman, 1994: 498}) \quad (2-6)$$

atau,

$$\varepsilon = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (\text{Holman, 1994 : 499}) \quad (2-7)$$

7. Number Transfer Unit (NTU)

Sebagai alat penukar kalor, performa sebuah *cooling tower* juga dinyatakan dalam *NTU* yang merupakan tolak ukur perpindahan kalor dari alat penukar kalor tersebut. Semakin besar harga *NTU* menunjukkan bahwa penukar kalor itu semakin mendekati batas termodinamikanya. Menurut W.F. Stoecker (1996:347), $\frac{hCA}{C_{pm}}$ dapat didefinisikan dalam istilah lain yaitu *NTU* (*Number of Transfer Unit*). Secara umum *NTU* untuk sebuah *cooling tower counter flow* dirumuskan dengan:

$$NTU = \frac{U.A}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (\text{Holman, 1994:507}) \quad (2-8)$$

Sedangkan menurut Lu Lu Wenjian Cai, *NTU* dari sebuah *counter flow cooling tower* bisa dirumuskan dalam bentuk:

$$NTU = - \frac{\ln \left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon m^*} \right)}{1-m^*} \quad (\text{Lu lu, 2000 : 3}) \quad (2-9)$$

$$\text{Dimana } m^* = \frac{\dot{m}a}{\dot{m}w} \cdot \frac{C_s}{C_{pw}}$$

Dengan $\dot{m}a$ = laju aliran udara lembab masuk.

$\dot{m}w$ = laju aliran udara lembab keluar.

m^* = laju massa alir kritis.

C_s merupakan kalor spesifik standar yaitu perbandingan Δh dengan ΔT aktual

$$C_s = \frac{h_a - h_{a0}}{T_{wi} - T_{wo}}$$

sehingga semakin tinggi *effectiveness* maka nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* juga semakin tinggi.

8. Kestimbangan energi dan massa

a. Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli menyatakan hubungan antara tekanan, kecepatan dan elevasi pada fluida dalam suatu saluran, dimana diasumsikan aliran *steady*, tidak ada gesekan dan fluida dianggap inkompresibel. Persamaan ini dituliskan

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994 - 116}) \quad (2-10)$$

dimana:

p = tekanan fluida [Pa]

ρ = massa jenis fluida [kg/m³]

v = kecepatan fluida [m/s]

g = percepatan gravitasi [m/s²]

z = beda elevasi [m]

b. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas menyatakan kesetimbangan massa fluida yang *steady* dalam saluran dengan kecepatan v [m/s] dan luas penampang saluran A [m²] dan dituliskan:

$$\rho \cdot v \cdot A = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994 - 114}) \quad (2-11)$$

untuk fluida inkompresible, harga ρ konstan sepanjang saluran, sehingga persamaan ini banyak dinyatakan dengan kapasitas Q [m^3/s]

$$Q = v \cdot A = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994} - 114) \quad (2-12)$$

2.4 Analisa perpindahan panas pada *counter flow cooling tower*.

Perpindahan kalor secara *direct contact* terjadi antara fluida panas dan fluida dingin akibat adanya kontak langsung dan pencampuran (*mixing*). Metode ini banyak digunakan untuk memanaskan atau mendinginkan udara dengan air maupun mendinginkan air dengan udara. Alat penukar kalor yang menerapkan cara ini biasanya dipakai pada sistem produksi gas, pengkondisian udara, *cooling tower* air dan kondensor uap.

Pada proses ini yang terjadi adalah perpindahan kalor secara konveksi, khususnya konveksi paksa, karena udara sebagai salah satu fluida kerjanya dihembuskan dengan bantuan gaya luar yaitu *blower*. Secara umum besarnya perpindahan kalor secara konveksi dapat dinyatakan menurut hukum Newton tentang pendinginan sebagai berikut:

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Holman, 1994} : 252) \quad (2-13)$$

dimana:

\dot{m} = laju massa aliran

C_p = kalor spesifik

ΔT = Selisih antara air masuk dan air keluar *cooling tower*
atau

$$q = U \cdot A \cdot (\Delta T) \quad [\text{W}] \quad (\text{Holman, 1994} : 490) \quad (2-14)$$

dimana:

U = koefisien perpindahan kalor konveksi [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$].

A = luas permukaan perpindahan kalor [m^2].

ΔT = selisih suhu fluida masuk dan fluida keluar [$^\circ\text{C}$].

2.5 Bilangan Reynolds dan Bilangan Nusselt

Fluida yang mengalir memiliki suatu pola aliran. Pola aliran tersebut adalah pola laminar yang bergerak secara teratur dan pola turbulen yang bergerak tidak teratur dan

acak. Proses perubahan dari aliran laminar ke aliran turbulen dipengaruhi oleh geometri, kekasaran, kecepatan, temperatur permukaan dan tipe fluida yang mengalir .

Untuk menentukan jenis aliran maupun tingkat turbulensinya, dapat dilihat dari besarnya perbandingan antara gaya inersia (*inertia force*) dengan gaya viskos (*viscous force*) pada fluida. Perbandingan ini disebut dengan bilangan Reynolds yang juga merupakan parameter tanpa dimensi, dimana untuk aliran eksternal dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya viskos}} && \text{(Cengel, 1998 – 352)} && (2-15) \\ &= \frac{\rho V^2 / \delta}{\mu V / \delta^2} \\ &= \frac{\rho V \delta}{\mu} \\ &= \frac{V \delta}{\nu} \end{aligned}$$

Dimana:

V = kecepatan aliran bebas (m/s)

δ = panjang karakteristik dari geometris (m)

$\nu = \mu/\rho$ = viskositas kinematik fluida (m²/s)

Viskositas kinematik adalah perbandingan antara viskositas dinamik μ dengan massa jenis fluida ρ .

Pada bilangan Reynolds yang besar, gaya inersia jauh lebih besar dibandingkan dengan gaya viskos-nya, sehingga gaya viskos ini tidak mampu menahan gerakan acak dan fluktuasi aliran yang cepat, dengan demikian terjadi aliran turbulen. Sedangkan pada bilangan Reynolds rendah, gaya viskos mampu menahan fluktuasi aliran sehingga tetap terjaga dalam bentuk berlapis-lapis pada arahnya masing-masing atau laminar.

Hubungan antara bilangan reynolds dan bilangan nusselt menurut Cengel (1998:357) dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} = C \text{Re}_L^m \text{Pr}^n \quad \text{(Holman, 1994 : 253)} \quad (2-16)$$

C , m dan n merupakan konstanta yang diperoleh dari hasil eksperimen dan nilainya berbeda pada tiap-tiap kasus. Dengan demikian berdasarkan dua rumusan diatas, tampak bahwa dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* akan memperbesar bilangan Nusselt yang mengakibatkan perpindahan kalor konveksi semakin efektif.

2.6 Sistem Distribusi Air pada *Cooling Tower*

Ada bermacam-macam metode distribusi air pada *cooling tower*, yaitu :

a. Gravitasi

Jenis ini banyak digunakan untuk menara-menara yang menggunakan metode aliran silang, dimana terdiri dari pipa penyalur air panas yang mengucurkan air ke bawah melalui orifice. Air jatuh karena adanya gaya gravitasi bumi keisian dibawahnya.

b. *Spray*

Umumnya digunakan untuk *cooling tower* jenis aliran berlawanan dan memiliki susunan pipa yang melintang dengan nosel yang menyemprot kearah bawah. Untuk menghasilkan semprotan (*spray*), biasanya digunakan *nozel*. Alat ini menyemprotkan air untuk membasahi bahan pengisi. Distribusi air yang seragam pada puncak bahan pengisi adalah penting untuk mendapatkan pembasahan yang benar dari seluruh permukaan bahan pengisi. *Nozel* dapat dipasang dan menyemprot dengan pola bundar atau segi empat, atau bisa juga menjadi bagian dari rakitan yang berputar seperti pada menara dengan beberapa potongan lintang yang memutar.

c. *Rotary*

Sistem ini mempunyai lengan horizontal yang dapat berputar pada poros vertikal. Air yang disemprotkan bertekanan cukup tinggi dan memiliki sudut yang dapat diatur. Akibat tekanan yang diberikan, timbul gaya reaksi yang mengakibatkan poros vertikal berputar dengan kecepatan yang dapat disesuaikan dengan mengatur sudut pancaran air.

2.7 Hipotesis

Pada nilai debit udara masuk yang tetap, semakin besar sudut aliran udara pada *cooling tower* menyebabkan luasan permukaan kontak antara air dan udara juga semakin besar sehingga total area perpindahan kalor akan semakin besar dan unjuk kerja *cooling tower* akan meningkat hingga titik tertentu kemudian menurun setelah melewati nilai maksimum.